

یک روش غیر مخرب جدید در تعیین نیروی پیش‌تندگی در تیرهای پیش‌تندیده بر اساس پاسخ‌های استاتیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد شریفی باقرین^{۱*}، موسی محمودی صاحبی^۲، محمد قاسم سحاب^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

*mohamadsharifi@sru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

چکیده

مسئله تعیین نیروی پیش‌تندگی در تاندون‌های سازه‌های بتنی پیش‌تندیده و پایش عدم تجاوز افت پیش‌تندگی از مقادیر مجاز، مسئله‌ای است که در طول دهه‌های گذشته پژوهشگران بسیاری به آن پرداخته و روش‌هایی در این زمینه ارائه کرده‌اند. امروزه به منظور پایش افت نیروی پیش‌تندگی در سازه‌های پر اهمیت، در هنگام ساخت، حسگرهایی در آن تعبیه می‌شود. لیکن نظر به عدم پیش‌بینی تجهیزاتی از این دست در سازه‌های قدیمی، پایش این نیروها، موجب آزمایش‌های مخرب و یا غیرمخرب اما کم‌دقت است. پس در این نوشتار، روشی ارائه شده است که بدون نیاز به حسگرهای موصوف و آزمایش‌های مخرب، تنها با اندازه‌گیری تغییر مکان‌های استاتیکی، قادر به تشخیص میزان افت پیش‌تندگی در تاندون‌های مقطع یک تیر بتنی پیش‌تندیده هستند. در این راستا الگوریتمی در محیط برنامه Python و مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و همچنین مدلسازی در برنامه تحلیل اجزای محدود فراهم شده است. نمونه عددی ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی مقادیر افت پیش‌تندگی را حتی با وجود ده درصد خطای عمدی ناشی از اندازه‌گیری، با دقت مطلوبی شناسایی می‌کند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت، نیروی پیش‌تندگی، تیرهای پیش‌تندیده، پاسخ‌های استاتیکی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

چنانچه پیش از اعمال بارهای بهره‌برداری^۱ که می‌توانند در عضو بتنی ایجاد تنش کششی نمایند، در مقطع عضو بتنی تنش-های فشاری به اصطلاح پیش‌تندیده اعمال شده باشد، پس از وارد شدن بارهای بهره‌برداری همه یا بخشی از تنش‌های کششی ناشی از اعمال بار، با تنش‌های فشاری اولیه خنثی شده و در نتیجه در مقطع عضو، تنش‌های کششی که موجب ترک خوردن آن است ایجاد نمی‌شود. به عبارت دیگر، هدف اصلی از پیش‌تندیده کردن یک عضو بتنی، محدود کردن تنش‌های کششی و ترک‌های ناشی از لنگر خمشی، تحت تأثیر بارهای وارد شده در آن عضو است [1].

در سال‌های اخیر استفاده از روش پیش‌تندگی بسیار ساده‌تر و موثرتر و مصالح آن بهینه‌سازی شده‌اند. امروزه درصد بالایی از سازه‌های در حال احداث در سطح جهان با استفاده از این تکنولوژی ساخته شده و پیش‌تندگی در احداث ساختمان‌های اداری، مسکونی، تجاری، پارکینگ، استادیوم‌های ورزشی، مخازن بتنی و سازه‌های ویژه مانند اسکله‌ها، کاربردهای وسیعی پیدا کرده است. از جمله سازه‌هایی که تشخیص به موقع خرابی در آن‌ها اهمیت زیادی دارد پل‌ها هستند [2].

پل‌های بزرگ راه‌ها، یکی از اساسی‌ترین اجزای سیستم حمل و نقل یک کشور بوده و جزء سازه‌های بزرگ و هزینه‌بر تلقی می‌شوند. تجربه و مطالعه نشان می‌دهد خرابی‌های گوناگون در طول عمر مفید این سازه‌ها بر روی آن‌ها تأثیر می‌گذارد [3-4]. علاوه بر عوامل طبیعی مانند خوردگی و فرسایش مواد تشکیل‌دهنده این سازه‌ها، که در طول عمر مفید آن‌ها به مرور رخ می‌دهد، می‌توان به کاهش نیروی پیش‌تندگی در کابل‌های پیش‌تندیده اشاره کرد.

در این راستا روش‌های متنوعی در بررسی سلامت پل‌ها در طول دهه‌های گذشته بکار گرفته شده است. بطور کلی می‌توان روش‌های ارزیابی سلامت سازه‌های مهندسی که در این مقاله مشخصاً به پل‌ها اختصاص دارد را به روش‌های مخرب و غیر مخرب تقسیم‌بندی کرد. به دلیل هزینه‌های بالای آزمایش‌های

مخرب و همچنین در بسیاری از موارد غیرممکن بودن انجام این آزمایش‌ها به دلیل خرابی بوجود آمده، روش‌های تشخیص خرابی غیر مخرب در پل‌ها ارجحیت داشته و تا به امروز روش‌های غیر مخرب گوناگونی برای آشکارسازی خرابی در پل‌ها پیشنهاد شده است [5].

یکی از معمول‌ترین روش‌های غیرمخرب پایش سلامت پل-ها بازرسی چشمی آنها است [6]. در این روش می‌توان در زمینه آسیب‌هایی که در جدار خارجی عرشه پل‌ها رخ داده است به قضاوت پرداخت. لیکن چنانچه پایش سلامت^۲ در سطوح درونی سازه مورد نظر باشد می‌توان از روش‌های مبتنی بر پژواک صوت استفاده کرد. روش‌های مبتنی بر پژواک^۳ و میدان مغناطیسی بر همین روش استوار هستند [7]. همچنین به منظور کنترل جابه‌جایی‌های ناشی از تغییر در مختصات هندسی و مکانیکی پل‌ها در برخی از موارد، از ابزارهای طول سنج مانند GPS، رادار و یا فناوری GPR استفاده می‌شود [8].

قابل ذکر است که این روش‌ها هزینه‌بر و وقت‌گیر بوده و هیچیک قضاوتی در راستای تعیین نیروی پیش‌تندیده باقی مانده در تاندون‌های پل پیش‌تندیده در اختیار قرار نمی‌دهد. پس می‌توان از روش‌های تشخیص خرابی تحلیلی مانند استفاده از مدل اجزاء محدود برای تشخیص خرابی در سازه‌ها استفاده نمود که این روش‌ها ضمن برخورداری از کارآمدی بیشتر، سریع‌تر و ارزان‌تر هستند. نظر به اهمیت بالای تخمین نیروی باقی مانده در تاندون‌های پیش‌تندگی، در دهه‌های گذشته تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرفته است. اولین تحقیق جدی در این زمینه در سال ۱۹۹۵ در قالب طراحی یک الگوریتم توسط آبراهام و همکاران صورت پذیرفت [9]. الگوریتم پیشنهادی ایشان گرچه قادر به تشخیص کاهش نیروی پیش‌تندگی در تیر بتنی که از یک تاندون بهره می‌برد را داشته، لیکن در رابطه با تفکیک میزان خرابی در تیرهای بتنی که بیش از یک تاندون در آنها تعبیه شده است ناتوان است. در ادامه روش‌های اندازه‌گیری انرژی کرنشی مودال [11-12] و اندازه‌گیری فرکانس و دوره تناوب سازه که ناشی از تغییرات در مشخصات هندسی سازه هستند

ارائه شد [12]. این روش‌ها نیز خرابی را به صورت تابعی از خرابی بتن عرشه و کاهش نیروی پیش تنیدگی ارائه داده و درک درستی نسبت به تفکیک این خرابی‌ها نسبت به یکدیگر در اختیار نمی‌گذارند. در قالب روشی دیگر در سال ۲۰۱۸ انحنا پل تحت یک بارگذاری مجدد، به عنوان عاملی در جهت کنترل و اندازه‌گیری آسیب در زمینه پیش‌تنیدگی توسط تونویر و همکارانش پیشنهاد شد [13]. آنها با اندازه‌گیری دقیق انحنا پل تحت اثر یک سناریوی بارگذاری مشخص و مقایسه آن با انحنا پل فاقد آسیب تحت همان سناریوی بارگذاری، روشی ارائه کردند. روش موصوف نیز مانند سایر روش‌های یاد شده در حوزه کشف آسیب یک تاندون معتبر بوده و در سازه‌هایی که از بیش از یک تاندون بهره می‌برند در زمینه تفکیک نیروی داخلی آنها از یکدیگر ناتوان است. همچنین با استناد به پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی حاصل از تحریک سازه در قالب بارگذاری و یا بار متحرک و مقایسه پاسخ‌ها با پاسخ سازه فاقد آسیب روش‌هایی پیشنهاد شده‌اند که کاهش نیرو را در سازه‌های بهره‌مند از یک تاندون تشخیص می‌دهند [14].

بررسی روش‌های یاد شده نشان می‌دهد اگرچه برخی از آنها میزان کاهش نیرو را بدرستی تشخیص می‌دهند لیکن در پاسخ به دو سوال اساسی ناتوان هستند. اولاً هیچ‌یک محل دقیق کاهش نیرو را نشان نمی‌دهند و ثانیاً در سازه‌های مورد مطالعه که بیش از یک تاندون در آنها استفاده شده است قابلیت تفکیک تاندون سالم از ناسالم وجود ندارد. پس در سالهای اخیر به منظور پایش دراز مدت سازه‌های پیش‌تنیده، تجهیزات و حسگرهای حساس به افت نیرو از قبیل حسگرهای فیبر نوری و FBG در مرحله ساخت پیش‌بینی شده و در محل‌های مورد نظر نصب می‌شوند [15, 16]. اما از آنجایی که لازمه تجهیزات فوق صرف هزینه زیادی بوده و امکان استفاده از آنها در سازه‌های قدیمی وجود ندارد نیاز به تکنیکی که بدون بکارگیری آنها، مقدار و محل کاهش نیرو را به تفکیک در همه تاندون‌ها نمایان کند همچنان باقی مانده است. در سال‌های اخیر و با فراگیر شدن بکارگیری هوش مصنوعی در مسایل مهندسی، پژوهش‌هایی مبتنی بر

الگوریتم‌های شبکه عصبی تهیه شده است که در مقایسه با روش‌های پیش از آن کارآمدتر هستند. از آن جمله می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط یانگ و هوانگ در سال ۲۰۲۰ بر روی تیر پیش‌تنیده بتنی [17] و تحقیق محمد عابدین و همکاران روی پل پیش‌تنیده در سال ۲۰۲۱ اشاره کرد [18]. روش مذکور با وجود کارامدی به لحاظ اعتبار پاسخ، به دلیل ماهیت و سازوکار روش شبکه عصبی نیازمند سطح وسیعی از اطلاعات اولیه و سناریوهای فراوان تحریک سازه است. پس نیاز به روشی نوین که با بهره‌گیری از کمترین اطلاعات اولیه و در کوتاهترین زمان قادر به کشف آسیب باشد احساس می‌شود. در این نوشتار روشی ارائه شده است که ضمن استفاده از ساده‌ترین ابزارها، تنها با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های استاتیکی تحت اثر سناریوهای متنوع بارگذاری و بهره‌گیری از یک الگوریتم هوش مصنوعی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، دقیق‌ترین نتایج را ارائه می‌دهد.

۲- روش انجام تحقیق

در هر سازه با رفتار خطی که بر اساس روش اجزاء محدود مدل سازی شده، بین بردار جابه‌جایی‌های گرهی، $\{U\}$ ، و بردار نیروهای گرهی، $\{F\}$ ، رابطه $\{F\} = [K]\{U\}$ برقرار است. در این رابطه $[K]$ ، ماتریس سختی بوده و عناصر آن تابعی از مشخصات فیزیکی مصالح است. حال چنانچه مشخصات فیزیکی مصالح به عنوان معیار آسیب تعریف شده باشد ماتریس سختی، شامل درایه‌های مجهول خواهد بود و چنانچه یک یا چند نیروی خارجی به عنوان آسیب تعریف شده باشد بردار نیرو، مقادیر مجهول را دربر خواهد گرفت. پس می‌توان مسئله را با قرار دادن متغیرهای مجهول در بردار نیرو و ماتریس سختی به عنوان یک مسئله چند متغیره تعریف کرد. در مقاله حاضر مسئله افت نیروی پیش‌تنیدگی به عنوان پارامتر مجهول تعریف شده است، بنابراین با معلوم بودن متغیرهای مربوط به مشخصات فیزیکی مصالح و جابه‌جایی، این مسئله از نوع مسائل مهندسی معکوس بوده و به لحاظ ریاضی قابل تحلیل است.

ادامه، تیر معیوب موصوف تحت یک سناریوی بارگذاری مشخص قرار گرفته و جابه‌جایی برخی از نقاط تیر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. لازم به توضیح است داده‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی تیر پیش‌تندیده که باید از روی تیر واقعی برداشت شود به کمک شبیه سازی رایانه‌ای استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود SAP2000 استخراج شده است. در اینجا، مقادیر جابه‌جایی به عنوان تنها اطلاعات از پاسخ سازه معیوب در اختیار بوده و الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از برنامه کامپیوتری مبتنی بر هوش مصنوعی در محیط برنامه PYTHON سعی در کشف این خرابی دارد [19]. برنامه رایانه‌ای موصوف در گام اول با یک حدس اولیه مقادیر تصادفی پیش‌تندگی به ۶ تاندون مورد نظر اختصاص داده و فرمان تحلیل تیر پیشنهادی را با هندسه و سناریوی بارگذاری مشابه نمونه اولیه ما که سازه پیشنهادی نامیده می‌شود، صادر می‌کند. برنامه SAP2000 که به برنامه هوش مصنوعی که در این مقاله یک الگوریتم جستجوی تکاملی [2]، متصل است این سازه پیشنهادی را تحلیل کرده، جابه‌جایی نقاط نظیر به نظیر با سازه شاهد را اندازه‌گیری کرده و در اختیار الگوریتم موصوف قرار می‌دهد. این برنامه با مقایسه پاسخ‌های سازه پیشنهادی و سازه شاهد در خصوص درستی سازه پیشنهادی تصمیم‌گیری می‌کند. واضح است احتمال اینکه سازه پیشنهادی اولیه هماهنگ بر سازه شاهد باشد بسیار ناچیز است، بنابراین برنامه مورد نظر با اعمال تغییراتی در حدس اولیه خود نیروهای پیش‌تندگی تصادفی را تغییر داده و سازه دیگری پیشنهاد می‌دهد. روند فوق تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پاسخ سازه پیشنهادی با سازه شاهد برابر شده و یا با یک تقریب مناسب و قابل چشم‌پوشی یکی شود. در اینجا دستور خاتمه برنامه صادر شده و آخرین سازه پیشنهادی با مقادیر پیش‌تندگی که برنامه برای آن حدس زده به عنوان «سازه جواب» معرفی می‌شود. حال با مقایسه مقادیر پیش‌تندگی سازه جواب با سازه شاهد می‌توان در خصوص درستی تکنیک بکار گرفته شده اعمال نظر کرد.

۱-۲- معادلات حاکم بر روش بکار گرفته شده

تکنیک معرفی شده در این بخش قادر به شناسایی و اندازه‌گیری آسیب در کل سازه اعم از هندسه سازه و همین‌طور افت

این نوشتار در پی کشف مقادیر پیش‌تندگی در تاندون‌ها با استفاده از مطالعه میزان جابه‌جایی استاتیکی سازه است. در این خصوص اولین سؤالی که باید به آن پاسخ داد این است که آیا جابه‌جایی سازه تابعی از میزان پیش‌تندگی تاندون‌ها هست یا خیر؟

برای بررسی و پاسخ به سؤال فوق یک تیر بتنی ساده متشکل از یک تاندون با یک سناریوی بارگذاری واحد، چنانکه در شکل (۱) نشان داده شده است در برنامه تحلیل سازه SAP2000 مدلسازی شده و جابه‌جایی یک نقطه دلخواه از آن اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در ادامه بدون اعمال تغییرات در هندسه و سناریوی بارگذاری، تنها با اعمال تغییرات در میزان نیروی پیش‌تندگی جابه‌جایی همان نقطه به تعداد مقادیر مختلف پیش‌تندگی اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۱) نشان می‌دهد جابه‌جایی سازه با مقدار پیش‌تندگی نسبت عکس دارد. بنابراین با علم به اینکه جابه‌جایی سازه تابعی از میزان پیش‌تندگی است می‌توان جابه‌جایی را معیاری برای مطالعه و اندازه‌گیری پیش‌تندگی در نظر گرفت.

شکل ۱. آشکارسازی رابطه نیروی پیش‌تندگی و جابه‌جایی در تیر بتنی پیش‌تندیده

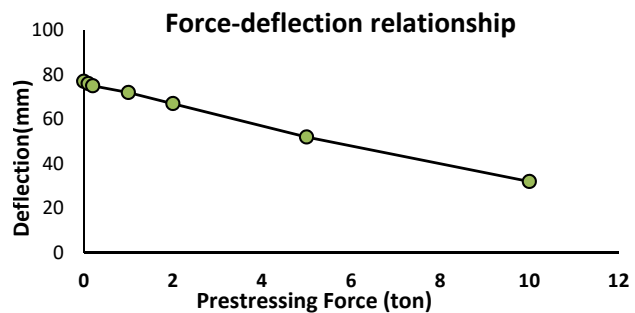


Fig. 1. Prestressing force-displacement relationship monitoring

روش پیشنهاد شده بر تحلیل کامپیوتری و مقایسه نتایج دو تیر بتنی پیش‌تندیده با هندسه، بارگذاری و آرایش تاندون یکسان استوار است. ابتدا یک تیر پیش‌تندیده مشخص در برنامه تحلیل SAP2000 مدلسازی شده و نیروی‌های پیش‌تندگی دلخواه بر آن اعمال شده و سپس این نیروها در برخی از تاندون‌های مورد بررسی کاهش داده می‌شود. این تغییر عمدی در مقادیر پیش‌تندگی به عنوان خرابی قلمداد شده و روش ارائه شده در این مقاله سعی در کشف میزان و محل خرابی این تیر دارد. در

پیش‌تندگی متمرکز شده است و برای کاهش میزان محاسبات، هندسه و سختی سازه فاقد آسیب فرض شده و معادله اساسی مبنای محاسبات، رابطه ۴ خواهد بود.

در ادامه اگر تیر مورد نظر در قالب چندین سناریوی متفاوت بارگذاری شده و هر بار جابه‌جایی نقطه‌ای دلخواه از این تیر اندازه‌گیری و ثبت شود می‌توان گفت $\{U_m\}_i$ جابه‌جایی نقطه‌ای از سازه در سناریوی شماره i بوده و اندیس m به سازه مورد بررسی که آن را سازه مجهول می‌نامیم اشاره دارد. همچنین می‌توان بردار نیروهای وارد بر سازه را با $\{F\}_i$ نشان داده و اندیس i از یک تا تعداد حالات بارگذاری متغیر خواهد بود. بردار $\{U_m\}_i$ متشکل از جابه‌جایی نقطه‌ای از تیر است که هر یک از آنها را با Δ_{mj} نشان می‌دهیم. در سوی دیگر جابه‌جایی نقاط نظیر به نظیر در تیر شاهد با Δ_{aj} نشان داده شده و هدف این مقاله در یافتن تیری است که اختلاف جابه‌جایی نقطه نظیر به نظیر تیر شاهد و تیر مجهول در آن ناچیز باشد. حال چنانچه بررسی جابه‌جایی چند نقطه نظیر به نظیر از دو تیر موصوف در یک سناریوی بارگذاری مشخص مد نظر باشد می‌توان برآیند توضیحات فوق را در قالب رابطه ۵ خلاصه کرد:

$$\left| \{U_m\}_i - \{U_a\}_i \right| = \{\varepsilon\}_i \quad (5)$$

در حالت آرمانی یعنی حالتی که دو تیر دارای پاسخ‌های استاتیکی کاملاً مشابه باشند جواب معادله فوق صفر خواهد بود؛ اما از آنجا که احتمال بروز چنین احتمالی در حوزه هوش مصنوعی بسیار ناچیز است یک معیار حداقل برای این معادله متصور شده و در صورت ارضا آن مسئله حل شده قلمداد می‌گردد. مقدار حداقل یاد شده که آن را معیار همگرایی می‌نامیم با توجه به شرایط مسئله و تشخیص کاربر متغیر بوده که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

در مسائل مهندسی معکوس برای اطمینان بیشتر از درستی پاسخ، بهتر است مسئله در قالب سناریوهای متفاوت بارگذاری بازتحلیل شود پس پیشنهاد می‌شود رابطه ۵ با اعمال امکان

پیش‌تندگی خواهد بود. در یک سازه با رفتار الاستیک خطی بردار جابه‌جایی‌ها تابعی از بردار نیروهای وارد شده به سازه بوده و آن را می‌توان در قالب رابطه ۱ بیان نمود:

$$\{U\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (1)$$

که در آن $[K]^{-1}$ ماتریس معکوس سختی سازه در حالت آسیب ندیده است. در مدل اجزای محدودی یک تیر دو بعدی که از اثر جابه‌جایی‌های برون صفحه‌ای آن صرف‌نظر شده و با N نقطه شناسایی می‌شود تعداد درجات آزادی برای هر نقطه از تیر ۳ بوده و ماتریس سختی جزئی هر نقطه 3×3 خواهد بود و این ماتریس نماینده مشخصات فیزیکی هر المان از قبیل طول و سطح مقطع بوده و در قالب رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$[K] = [A][P][A]^T \quad (2)$$

که در آن $[A]$ به ماتریس تبدیل مشخصات هندسی سازه اشاره داشته و ماتریس قطری $[P]$ حاوی اطلاعات سختی سازه است. حال چنانچه بررسی آسیب در هندسه تیر مورد بررسی باشد می‌توان از اندازه‌گیری درایه‌های ماتریس سختی در نقاط المان محدودی مورد نظر و پرداختن به میزان تغییرات در درایه‌های این ماتریس در قالب رابطه ۳ نسبت به شناسایی آسیب هندسی تیر اظهارنظر کرد:

$$\{U_d\} = [K + \Delta K]^{-1}\{F\} \quad (3)$$

که در آن $\{U_d\}$ به جابه‌جایی حاصل از تغییرات سختی در تیر آسیب دیده اشاره دارد.

حال با استدالی مشابه، چنانچه تغییرات در نیروی پیش‌تندگی مورد بررسی باشد می‌توان با مطالعه رابطه ۴ در این مورد تحقیق و نتیجه‌گیری کرد:

$$\{U_d\} = [K]^{-1}\{F + \Delta F\} \quad (4)$$

که در آن $\{U_d\}$ بیانگر جابه‌جایی رؤیت شده در سازه تحت بررسی است.

آنچه از روابط اشاره شده مشخص می‌شود این است که روش ارائه شده قابلیت تشخیص آسیب تیر پیش‌تند شده را دارا بوده و با حل معادلات چند متغیره آسیب‌های ناشی از کاهش پیش‌تندگی و هندسه تیر را به صورت همزمان شناسایی می‌کند. اما از آنجا که مقاله حاضر بر آسیب‌های ناشی از کاهش

نایب‌سته هستند به عنوان یک ابزار کارآمد بکار گرفته می‌شود [21, 22]

الگوریتم ژنتیک را می‌توان به طور ساده، یک روش جستجوگر نامید که بر پایه مشاهده ویژگی‌های فرزندان نسل‌های متوالی و انتخاب فرزندان بر اساس اصل بقای بهترین، پایه‌ریزی شده است. الگوریتم ژنتیک روی فرزندان یک نسل (جواب‌های مسئله در یک مرحله)، از قوانین موجود در علم ژنتیک تقلید کرده و با به کار بردن آنها، به تولید فرزندان با ویژگی بهتر (جواب‌های نزدیک‌تر به هدف مسئله) می‌پردازد. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل فرزندان (جواب‌های) انتخاب شده، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی بدست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشند. این رقابت میان ژن‌ها و پیروز شدن ژن غالب (انتخاب شدن توسط الگوریتم برای تولیدمثل بعدی) و کنار رفتن ژن‌های مغلوب (جواب‌های دور از هدف مسئله) روش کارآمدی برای حل مسائل پیچیده و دشوار است. سازوکار الگوریتم مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. الگوریتم روش بکار گرفته شده برای مینیم کردن تابع خطا

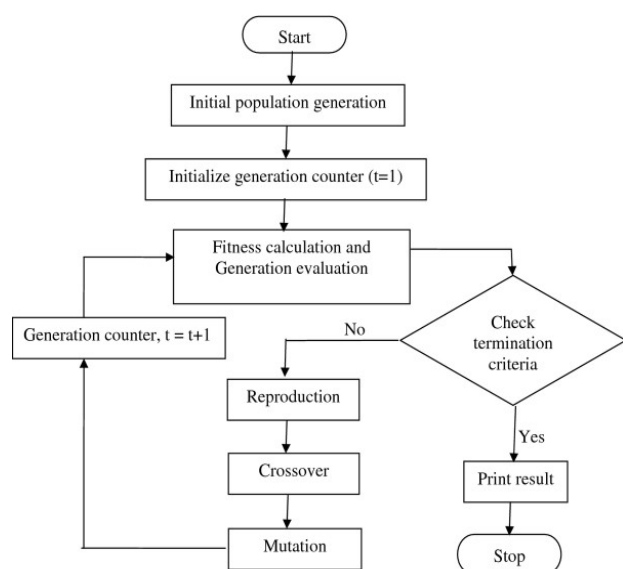


Fig. 2. Schematic of the proposed error function minimizing technique

بررسی‌های مجدد به شکل رابطه ۶ که تابع خطا ۱ نامیده می‌شود

$$\text{Minimize } \psi_1 = \sum_{i=1}^{NLC} \sum_{j=1}^n |\Delta_{mij} - \Delta_{aij}| = \sum_{i=1}^{NLC} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

که در آن n به تعداد نقاطی که جابه‌جایی آنها اندازه‌گیری می‌شود اشاره دارد. این رابطه مبین این واقعیت است که با کاهش مقدار عبارت فوق همگرایی به پاسخ ایده‌آل افزایش میابد. همچنین نظر به بکارگیری الگوریتم ژنتیک که در بخش آتی به آن اشاره می‌شود هر یک از پاسخ‌ها (سازه‌های پیشنهادی) در هر نسل از پاسخ‌ها به فراخور میزان همگرایی که حاصل کرده‌اند باید شانس حضور در نسل‌های آتی را داشته باشند. میزان همگرایی هر پاسخ به پاسخ ایده‌آل که تابع برازندگی ۲ نامیده شده و با F_i نمایش داده می‌شود. این شاخص در قالب رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$F_i = \frac{\sum_{i=1}^k |\Delta_{mi} - \Delta_{ai}|}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n |\Delta_{mi} - \Delta_{ai}|} \quad (7)$$

که در آن k تعداد پاسخ‌هایی است که در هر مرحله به صورت همزمان ارزیابی می‌شوند.

رابطه ۷ نشان می‌دهد با افزایش همگرایی یک پاسخ، مقدار برازندگی آن کاهش می‌یابد. پس در جهت همنا کردن

$$\omega_i = \frac{1}{F_i} \quad (8)$$

رابطه ۸ در مسائل مهندسی معکوس تابع هدف ۳ نامیده شده و شاخصی مناسب برای سنجش میزان هماهنگی هر پاسخ به شمار می‌آید.

۲-۲- مینیم کردن تابع خطا با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک

امروزه هوش مصنوعی در بسیاری از مسائل مهندسی که مستلزم بهینه‌سازی و جستجوی بهترین پاسخ در محیط‌های

۱-۲-۲- معیار همگرایی

تیر دارد. هندسه و آرایش تاندون تیر مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است.

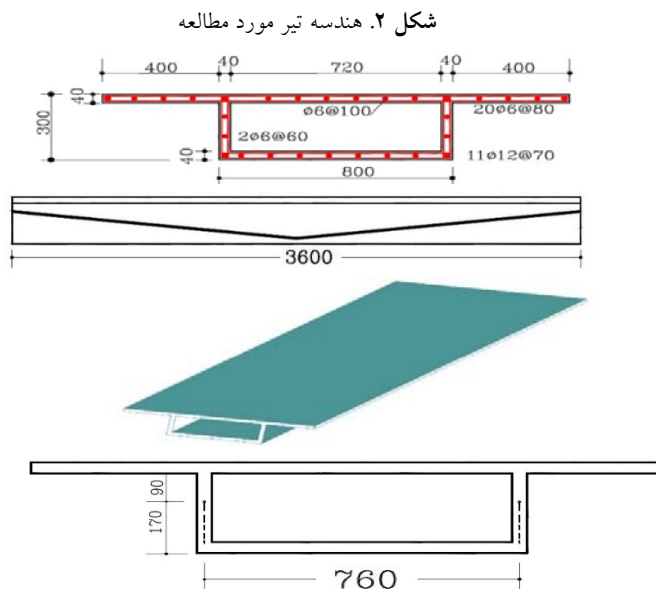


Fig. 3. Schematic view of the case study

۱-۳-۱- نتایج

در اینجا با اعمال نیروی کششی ۷ تنی به تاندون‌های شش گانه تیر مورد آزمایش و تقسیم‌بندی المان محدودی این تیر به پنج گره شامل دو تکیه‌گاه انتهایی و همچنین سه نقطه میانی در فواصل یک چهارم دهانه از تکیه‌گاه و نقطه میانی تیر و اعمال خرابی عمده در برخی از تاندون‌های یاد شده در قالب کاهش نیروی پیش‌تندگی تکنیک مورد نظر را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. از آنجا که مقادیر مشخصی از کاهش پیش‌تندگی باید به عنوان گزینه‌های مورد حدس تعریف شود این مقادیر به شرح زیر تعریف و کدگذاری می‌شود:

با توجه به ارزش‌گذاری مبتنی بر هماهنگی هر یک از پاسخ‌ها که با عبارت Fitness نامگذاری شد، منطقی است پاسخ‌هایی که بیشترین هماهنگی را داشته باشند از درجه اعتبار بیشتری برخوردار بوده و شانس بیشتری در تولید نسل‌های بعد داشته باشند. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که تولید نسل‌های بعد تا چه مرحله‌ای ادامه خواهد داشت؟ در پاسخ سریع به این سؤال می‌توان گفت عملیات جستجو تا مرحله‌ای که پاسخ بدست آمده از آخرین مرحله جستجو، هماهنگی کافی با پاسخ ایده‌آل داشته باشد ادامه میابد. انطباق کافی می‌تواند در قالب یک عدد که بازه همگرایی را نشان می‌دهد تعریف شود. این بازه همگرایی با توجه به شرایط مساله و به تشخیص کاربر، متغیر بوده و در مقاله حاضر برابر با 0.1 میلی‌متر تعریف شده است. همچنین می‌توان معیار همگرایی را نزدیک بودن بهترین و بدترین پاسخ آخرین نسل در نظر گرفت (رابطه ۹) و یا در قالب مقایسه بهترین جواب آخرین نسل با میانگین همه پاسخ‌های بدست آمده در همان نسل تعریف کرد (رابطه ۱۰).

$$\psi_2 = \frac{\omega_1 - \omega_m}{\omega_1} \leq \varepsilon_2 \quad (9)$$

$$\psi_3 = \frac{\omega_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_i} \leq \varepsilon_3 \quad (10)$$

در اینجا m به تعداد پاسخ‌ها در هر نسل اشاره داشته و مقادیر ε_2 و ε_3 بسته به شرایط مسئله و نظر کاربر تعریف می‌شود. لازم به توضیح است هیچ یک از معیارهای همگرایی فوق بر دیگری برتری نداشته و هر یک از آنها و یا ترکیبی از آنها می‌تواند به عنوان شرط خاتمه جستجو به الگوریتم معرفی شده و پاسخ مورد نظر را به عنوان پاسخ نهایی قلمداد کرد.

۳- مطالعه موردی

در این مقاله، یک تیر بتنی پیش‌تندیده که هندسه آن در شکل‌های زیر نمایش داده شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تیر از مرجع ۲۱ انتخاب شده و تحلیل و طراحی آن مطابق با معیارهای تحلیل و طراحی سازه بتنی پیش‌تندیده است [21]. تیر موصوف دارای شش تاندون فولادی بوده و این مقاله سعی در تعیین میزان نیروی پیش‌تندگی در هر یک از تاندون‌ها و در نقاط تکیه‌گاهی

۴- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت از مقاله پاسخ‌های نهایی استخراج شده از برنامه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. باید به این نکته توجه داشت که سازوکار این روش بر اصول جستجوی تصادفی استوار بوده و در بسیاری از مسائل، احتمال دستیابی به پاسخ ایده‌آل بسیار اندک است. پس منطقی است که با بهره‌گیری از یک جامعه آماری وسیع احتمال دستیابی به پاسخ قابل اعتماد را بالا برد. در این رابطه پیشنهادات زیر به کاربران توصیه شده و در اینجا مورد استفاده قرار گرفته شده است:

- اجرای چندباره برنامه با یک سناریوی بارگذاری واحد و قرائت جابه‌جایی نقاط مشترک و مقایسه نتایج با یکدیگر
- اجرای چندباره برنامه با سناریوهای بارگذاری متفاوت و قرائت جابه‌جایی نقاط متفاوت و مقایسه نتایج با یکدیگر
- اجرای هم‌زمان برنامه با سناریوهای متفاوت و در نظر گرفتن اثر تجمعی آنها
- اعمال تغییر در نرخ فاکتور جهش در الگوریتم و اجرای دوباره برنامه

در پایان و با مقایسه پاسخ‌های بدست آمده در هر مرحله از اجرای برنامه چنانچه یک پاسخ دو بار و یا بیشتر تکرار شده باشد می‌توان آن را به عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفت. همچنین برای ارزیابی حساسیت الگوریتم پیشنهادی با اعمال درصدی از خطای عمدی در قرائت جابه‌جایی‌ها پاسخ‌های برنامه مورد بررسی قرار گرفته شده است.

چنانکه در شکل (۴) نشان داده شده است موقعیت و مقدار افت نیروی پیش‌تندگی در تاندون‌های شش گانه بدرستی تشخیص داده شده است. پاسخ بدست آمده حاصل از ۱۵ اجرای الگوریتم در قالب دو سناریوی بارگذاری مختلف انجام شده و این پاسخ ۴ مرتبه تکرار شده است. همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد پاسخ مورد نظر با در نظر گرفتن ψ_1 بعنوان تنها معیار همگرایی در نسل شماره ۲۵۰ الگوریتم شناسایی شده است. شکل (۶) نیز تحلیل همین مساله در نسل‌های مختلف با در نظر گرفتن هم‌زمان ψ_1 و ψ_2 به عنوان معیارهای همگرایی نشان داده شده است. شکل‌های موصوف نشان می‌دهد در نظر گرفتن دو

جدول ۱. کدگذاری باینری شدت آسیب احتمالی در تاندون‌های شش گانه

Remaining Force (Kg)	Damage Number (decimal)	Damage Code (binary)	$F_r = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\%$
7000	0	0000	0
6500	1	0001	7
6000	2	0010	14
5500	3	0011	21
5000	4	0100	28
4500	5	0101	36
4000	6	0110	43
3500	7	0111	50
3000	8	1000	57
2500	9	1001	64
2000	10	1010	71
1500	11	1011	79
1000	12	1100	86
500	13	1101	93
0	14	1110	100

Table 1. Binary of the severity of possible damage in the 6 tendons

که در آن F_r شاخص آسیب بوده و به درصد افت نیروی پیش‌تندگی اشاره دارد. چنانکه در جدول (۱) مشخص است تعداد حالات مورد بررسی به ۱۵ حالت محدود می‌شود. حال با توجه به اینکه تعداد ۱۵ حالت خرابی در شش تاندون مورد جستجو قرار می‌گیرد می‌توان تعداد کل حالات فضای احتمالاتی را 2^{15} تعریف کرد. ویژگی عدد مذکور بسیار بزرگ بوده و تکنیک بکار گرفته شده در این مقاله قادر خواهد بود با بررسی فضای کوچکی از فضای احتمالاتی کل، پاسخ را بیابد. در ادامه یک حالت خرابی ۱ عمدی دلخواه که کاهش پیش‌تندگی در نقاطی از تیر شاهد را در بر می‌گیرد مطابق جدول (۲) تعریف شده و در برنامه تحلیل تیر جابه‌جایی نقاطی دیگر تحت یک سناریوی بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. جدول (۲) نشان می‌دهد کاهش پیش‌تندگی در هر شش تاندون تعریف شده است. سپس الگوریتم هوش مصنوعی تهیه شده با یک حدس اولیه و سازوکاری که توضیح داده شد در صدد کشف محل و میزان خرابی بر می‌آید.

جدول ۲. محل و میزان آسیب (کاهش پیش‌تندگی) در تاندون‌های شش گانه

Tendon Number	1	2	3	4	5	6
Force (Kg)	6000	7000	5000	7000	7000	3000

Table 2. Locality and quantity of damage in the 6 tendons

عمدی اندازه‌گیری جابه‌جایی که می‌تواند ناشی از خطای قرائت کاربر و یا عدم دقت دستگاه اندازه‌گیری باشد، عملیات جستجو تکرار شده است. همان‌گونه که شکل (۷) نشان می‌دهد با وجود ۱۰ درصد خطای عمدی اندازه‌گیری جابه‌جایی، تکنیک ارائه شده قادر به تشخیص پاسخ صحیح با دقت ۹۳ درصد است. لیکن اعمال ۲۰ درصد خطای اندازه‌گیری، همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است الگوریتم پیشنهادی را از درجه اعتبار ساقط می‌کند.

شکل ۶. نمودار مقایسه نیروهای پیش‌تندگی واقعی با نیروهای پیش‌تندگی تحلیلی، اعمال ۱۰ درصد خطای اندازه‌گیری جابه‌جایی

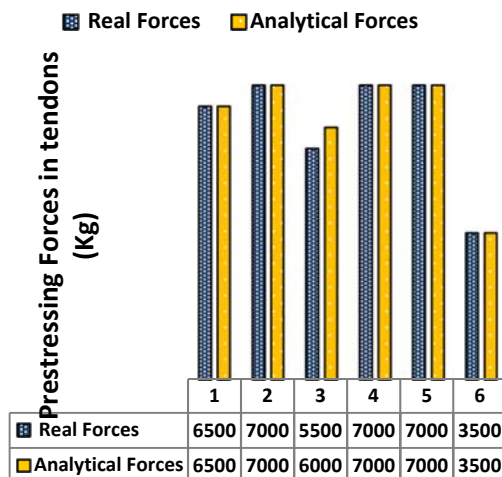


Fig. 7. Comparison diagram of real and analytical prestressing forces, applying 10% measurement error

شکل ۷. نمودار مقایسه نیروهای پیش‌تندگی واقعی با نیروهای پیش‌تندگی تحلیلی، اعمال ۲۰ درصد خطای اندازه‌گیری جابه‌جایی

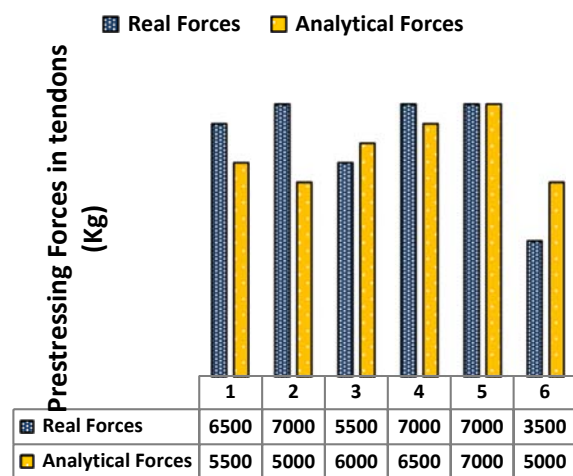


Fig. 8. Comparison diagram of real and analytical prestressing forces, applying 20% measurement error

معیار همگرایی بصورت همزمان سرعت دستیابی به پاسخ را کاهش می‌دهد.

شکل ۳. نمودار مقایسه نیروهای پیش‌تندگی واقعی با نیروهای پیش‌تندگی تحلیلی

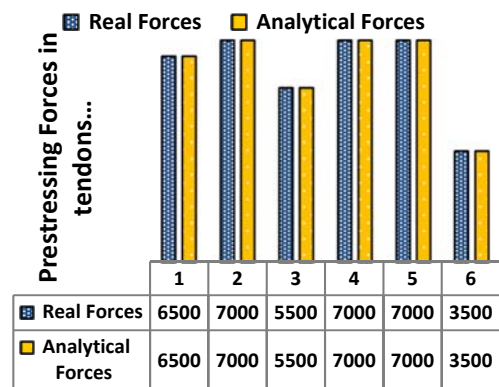


Fig. 4. Comparison diagram of real and analytical prestressing forces

شکل ۴. منحنی همگرایی در نسل‌های مختلف، انتخاب ψ_1 بعنوان تنها معیارهای همگرایی

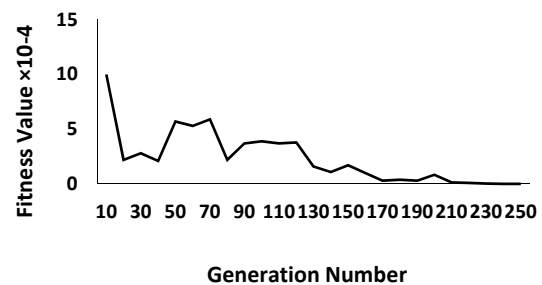


Fig. 5. Convergence diagram, considering ψ_1 as the only convergence criterion

شکل ۵. منحنی همگرایی در نسل‌های مختلف، انتخاب همزمان ψ_1 و ψ_2 به عنوان معیارهای همگرایی

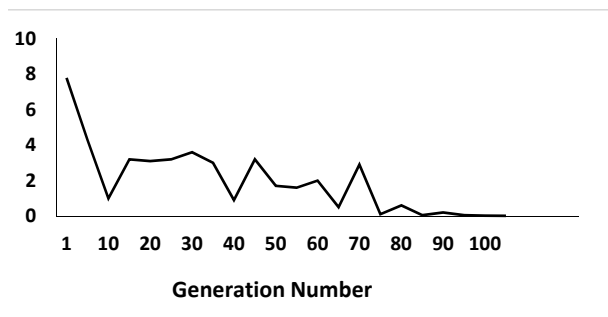


Fig. 6. Convergence diagram, considering ψ_1 and ψ_2 as convergence criteria

در ادامه برای ارزیابی حساسیت الگوریتم پیشنهادی به خطای ناشی از اندازه‌گیری، با اعمال ۱۰ درصد و ۲۰ درصد خطای

۵- نتیجه‌گیری

نوآوری این مقاله تعیین مقدار نیروی پیش‌تندگی در تیرهای بتنی پیش‌تندیده‌ای که حسگرهای اندازه‌گیری نیرو در آنها پیش‌بینی نشده است بدون نیاز به آزمایشات مخرب و تنها با اندازه‌گیری جابه‌جایی استاتیکی تحت بارگذاری متمرکز است. در قالب یک نمونه عددی روی یک تیر پیش‌تندیده بتنی متشکل از ۶ تاندون فولادی نشان‌داده شد جابه‌جایی، تابعی از میزان پیش‌تندگی بوده و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک محل و میزان کاهش آن توسط تکنیک بکار گرفته شده به درستی تشخیص داده شد. در ادامه برای بررسی حساسیت الگوریتم پیشنهادی به خطای میدانی ناشی از اندازه‌گیری جابه‌جایی، ۱۰ درصد خطای عمودی اندازه‌گیری جابه‌جایی اعمال شد و نتایج نشان داد روش پیشنهادی قادر به تشخیص پاسخ با دقت ۹۳ درصد است. همچنین برای نخستین بار در یک مساله مهندسی مبتنی بر هوش مصنوعی، تاثیر به کارگیری همزمان معیارهای همگرایی متفاوت در سرعت دستیابی به پاسخ ارزیابی شد. به عنوان پیشنهاد برای کارهای آینده این مقاله قابلیت توسعه در تشخیص همزمان کاهش پیش‌تندگی و خرابی بتن عرشه تیر را خواهد داشت.

۶- منابع

- [6] Park, S., Stubbs, N., Bolton, R., Choi, S., & Sikorsky, C. (2001). "Field verification of the damage index method in a concrete box-girder bridge via visual inspection". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16(1), 58-70.
- [7] Sohn, H., Dutta, D., Yang, J. Y., DeSimio, M., Olson, S., & Swenson, E. (2011). Automated detection of delamination and disbond from wavefield images obtained using a scanning laser vibrometer. *Smart Materials and Structures*, 20(4), 045017.
- [8] Solla, M., Lorenzo, H., Novo, A., & Caamaño, J. C. (2012). Structural analysis of the Roman Bibei bridge (Spain) based on GPR data and numerical modelling. *Automation in Construction*, 22, 334-339.
- [9] Abraham, M. A., Park, S., & Stubbs, N. (1995, April). Loss of prestress prediction based on nondestructive damage location algorithms. In *Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways* (Vol. 2446, pp. 60-67). International Society for Optics and Photonics.
- [10] Cha, Y. J., & Buyukozturk, O. (2015). Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(5), 347-358.
- [11] Zhao, L., Kim, C. W., Goi, Y., & Takemura, K. (2021). Vibration-Based Damage Detection for a Prestressed Concrete Box Girder by Means of Subspace Analysis. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7(4), 04021056.
- [12] Shiravand, M. R., & Parvanehro, P. (2017). Numerical study on damage mechanism of post-tensioned concrete box bridges under close-in deck explosion. *Engineering Failure Analysis*, 81, 103-116.
- [13] Tonnoir, B., Carde, C., & Banant, D. (2018). Curvature: An Indicator of the Mechanical Condition of Old Prestressed Concrete Bridges. *Structural Engineering International*, 28(3), 357-361.
- [14] Li, H., Lv, Z., & Liu, J. (2013). Assessment of prestress force in bridges using structural dynamic responses under moving vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- [15] Chen, S. Z., Wu, G., Xing, T., & Feng, D. C. (2017). Prestressing force monitoring method for a box girder through distributed long-gauge FBG
- [1] Tabatabai, H. and Dickson, T.J., 1993. "The history of the prestressing strand development length equation". *PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. JOURNAL*, 38(6).
- [2] Salem, H. M., & Helmy, H. M. (2014). "Numerical investigation of collapse of the Minnesota I-35W bridge". *Engineering Structures*, 59, 635-645.
- [3] Davis, A. G., Ansari, F., Gaynor, R. D., Lozen, K. M., Rowe, T. J., Caratin, H., ... & Sansalone, M. J. (1998). "Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. American Concrete Institute", ACI, 228.
- [4] McCann, D. M., & Forde, M. C. (2001). "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures". *Ndt & E International*, 34(2), 71-84.
- [5] Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2019). Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—An overview. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8), e2374.

- [19] Raschka, S., Patterson, J., & Nolet, C. (2020). Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence. *Information*, 11(4), 193.
- [20] Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). Genetic algorithms. In *Introduction to genetic algorithms* (pp. 15-37). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [21] Sahab, M. Gh., (2015). Determination of prestressing force in prestressed concrete beams based on damage detection methods and laboratory validation, 10th International Congress of Civil Engineering, Tabriz, Iran "(In Persian)".
- [22] Pellegrino, C., Zanini, M. A., Faleschini, F., & Corain, L. (2015). Predicting bond formulations for prestressed concrete elements. *Engineering Structures*, 97, 105-117.
- sensors. *Smart Materials and Structures*, 27(1), 015015.
- [16] Khandel, O., Soliman, M., Floyd, R. W., & Murray, C. D. (2021). Performance assessment of prestressed concrete bridge girders using fiber optic sensors and artificial neural networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(5), 605-619.
- [17] Yang, S., & Huang, Y. (2021). Damage identification method of prestressed concrete beam bridge based on convolutional neural network. *Neural Computing and Applications*, 33(2), 535-545.
- [18] Abedin, M., Mokhtari, S., & Mehrabi, A. B. (2021, March). Bridge damage detection using machine learning algorithms. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XV* (Vol. 11593, p. 115932P). International Society for Optics and Photonics.

A novel non-destructive method to determination of prestressing force in prestressed beams based on static responses using genetic algorithm

Mohamad sharifi bagherin^{1*}, Mussa Mahmoudi Sahebi², Mohamad Ghasem Sahab³

1-Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

*mohamadsharifi@sru.ac.ir

Abstract:

The problem of determining the prestressing force in the tendons of prestressed concrete structures and monitoring the non-exceedance of prestressing drops is an issue that has been addressed by many researchers over the past decades and has provided methods in this field. Today, pre-installation sensors are installed in important prestressed concrete structures to monitor prestressing loss. However, due to the unpredictability of such equipment in older structures, monitoring of these forces requires destructive or non-destructive testing but is inaccurate. Therefore, in this paper, a method is presented that without the need for these sensors and destructive tests, only by measuring static displacement, is able to detect the amount of prestressing loss in the cross-sectional tendons of a prestressed concrete beam. In this regard, an algorithm in the Python program environment based on genetic algorithm as well as modeling in the finite element analysis program is provided. The numerical example presented in this research shows that the proposed algorithm detects the values of prestressing loss with good accuracy even in spite of 10% of the intentional error due to measurement. In recent years, the use of prestressing methods has become much simpler and more effective, and its materials have been optimized. Today, a high percentage of structures under construction worldwide are built using this technology, and the advance has found wide applications in the construction of office buildings, residential, commercial, parking lots, sports stadiums, concrete tanks and special structures such as piers. Therefore, in recent years, for long-term monitoring of prefabricated structures, equipment and sensors sensitive to force drop, such as fiber optic sensors and FBG sensors in the construction phase are predicted and installed in the desired locations. [13] However, since the above equipment requires a lot of money and it is not possible to use them in old structures, the need for a technique that shows the amount and location of force reduction in all tendons without using them remains. Therefore, in this paper, a method is presented that, while using the simplest tools, provides the most accurate results only by measuring static displacements under the effect of various loading scenarios and using an artificial intelligence algorithm based on genetic algorithm. The proposed method is based on computer analysis and comparison of the results of two prestressed concrete beams with the same geometry, loading and arrangement of tendons. First, a specific prestressing beam is modeled in the SAP2000 analysis program and the desired prestressing forces are applied to it, and then these forces are reduced in some of the studied tendons. This deliberate change in prestressing values is considered as failure and the technique presented in this mapping tries to discover the extent and location of failure of this beam. In other words, this paper is the determination of the amount of prestressing force in prestressed concrete beams in which force measuring sensors are not predicted without the need for destructive testing and only by measuring the static displacement under load. In the form of a numerical example on a prestressed concrete beam consisting of 6 steel tendons and using a genetic algorithm, it was shown that the displacement is a function of the amount of prestressing and its location and amount of reduction by the technique used. It was correctly detected with 93% accuracy when 10% of the deliberate error due to displacement field measurement was applied. As a suggestion for future work, this research will be able to be developed in the simultaneous diagnosis of prestressing reduction and beam concrete failure.

Abstract: Health monitoring, Prestressing Force, Prestressed Beams, Static Responses, Genetic Algorithm